

· 专题研究 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2025.4013

鲁西新太古代末期构造演化

——来自徂徕山二长花岗岩的 U-Pb 年龄和岩石化学证据

刘伟¹, 靳立杰^{1,2}, 阎海青³, 周永刚¹, 张振飞¹, 高继雷¹, 王刚¹, 王辉¹,
李春稼¹, 王子圣¹

(1. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250014; 2. 富铁矿勘查开发技术山东省工程研究中心, 山东 济南 250014;
3. 中国冶金地质总局山东局测试中心, 山东 济南 250013)

摘要: 鲁西地区是开展华北克拉通东部早前寒武纪地质演化的最佳地区之一, 赋存有丰富的地球早期地壳演化和太古宙板块构造信息。本文对徂徕山地区的二长花岗岩进行了系统研究, 进一步揭示了华北克拉通东部鲁西地区前寒武纪地壳演化历史。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年显示, 二长花岗岩形成于约 2.48 Ga, 该年龄同时约束了徂徕山地区深熔作用的时限。岩石主量元素分析显示其高 Si, 富 Na 和 K, 低 P, $A/CNK=0.94\sim1.10$, 属于高钾钙碱性系列。微量元素方面, 轻稀土元素富集, Eu 异常不明显, 富集 Rb、Sr、Ba 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素。综合分析认为徂徕山二长花岗岩来源于约 2.7 Ga 加厚下地壳(英云闪长质 TTG 岩石)的部分重熔, 形成于新太古代末期陆块碰撞造山后的伸展环境, 标志着新太古代晚期鲁西地区微陆块已拼贴完成, 并与其他地区一起构成稳定的华北太古宙克拉通。

关键词: 二长花岗岩; 地球化学; 新太古代晚期-古元古代早期; 鲁西; 华北克拉通

中图分类号: P581.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)02-0243-16

Late Neoarchean tectonic evolution of western Shandong: Evidence from U-Pb chronology and petrogeochemistry of monzogranites in the Culai Mountain

LIU Wei¹, JIN Li-jie^{1,2}, YAN Hai-qing³, ZHOU Yong-gang¹, ZHANG Zhen-fei¹, GAO Ji-lei¹,
WANG Gang¹, WANG Hui¹, LI Chun-jia¹ and WANG Zi-sheng¹

(1. No. 1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan 250014, China; 2. Shandong Engineering Laboratory for High-Grade Fe Ores Exploration and Exploitation, Jinan 250014, China; 3. Shandong Testing Center of China Metallurgical Geology Bureau, Jinan 250013, China)

Abstract: Early Precambrian basement is well developed in western Shandong Province of the North China Craton. This paper shows a systematic study of the monzogranites from Culai Mountain, western Shandong, revealing the evolution history of Precambrian crust in the eastern part of North China Craton. LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating shows that the monzogranites from Culai Mountain were formed at about 2.48 Ga, which also restricts the time limit of metamorphism-anatexis in Culaishan area. The rocks have high Si, Na and K, low P, a A/CNK ratio of $0.94\sim1.10$, and belong to the high-K calc-alkaline series. The monzogranites exhibit enriched light rare earth

收稿日期: 2024-01-24; 接受日期: 2024-11-15; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 山东省地质勘查项目(SDZS-2015-GTT01)

作者简介: 刘伟(1989-), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质调查与矿产勘查工作, E-mail: 534681467@qq.com; 通讯作者: 靳立杰(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质调查与矿产勘查工作, E-mail: jinlijie1987@163.com。

elements (LREEs) with no δEu anomalies, and are enriched in large ion lithophile elements (LILEs) (e. g., Rb, Sr and Ba), and depleted in high field strength elements (HFSEs) (e. g., Nb, Ta, P and Ti). Based on comprehensive analysis, it is believed that the monzogranite from Culai Mountain originated from partial remelting of the about 2.7 Ga thickened lower crust (tonalite TTG rocks). Formed in an extensional environment after collisional orogenesis, it marks that the completion of the collage of micro-land masses in western Shandong in the late Neoproterozoic, and together with other regions to form a stable North China Archean Craton.

Key words: monzogranite; geochemistry; late Neoproterozoic-early Paleoproterozoic; western Shandong; North China Craton

Fund support: Geological Exploration Project of Shandong Province (SDZS-2015-GTT01)

作为地球上最古老的克拉通之一,华北克拉通是由中亚造山带、苏鲁造山带、秦岭-大别造山带以及祁连造山带所围限的一个早前寒武纪稳定地块(图1a),主要由前寒武纪变质基底和中新元古代-显生宙沉积盖层以及少量中生代侵入体等组成(郭云鹏等, 2018; 佟鑫等, 2023)。越来越多的锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素资料表明,华北克拉通在约 3.8 Ga 开始发育并经历了后期一系列多阶段的构造-岩浆和变质作用过程(Wu *et al.*, 2008; Zhai and Santosh, 2011; Wan *et al.*, 2012),是研究地球早期大陆形成和构造演化的热点地区。对于华北地块克拉通化过程,长期以来存在着巨大的争议。有些学者认为,华北克拉通在新太古代晚期不曾发生克拉通化,华北克拉通东、西部之间为一个长期连续发育的岛弧,未曾发育陆内裂谷,仅在约 1.85 Ga 发生一次克拉通化(Zhao *et al.*, 2005);而翟明国(2011)提出华北地块在 2.9~2.7 Ga 的巨量陆壳增生之后,在新太古代晚期和古元古代末经历了两期克拉通化事件。

与世界其他克拉通以约 2.70 Ga 的岩浆活动为主要活动期不同,华北克拉通约 2.50 Ga 的岩浆活动十分强烈(耿元生等, 2010),是了解太古宙末期地壳演化并探索地球动力学机制转变的重要窗口(王伟等, 2015)。近年来,中外地质学者对华北克拉通东部陆块的太古宙结晶基底开展了大量地质研究工作,初步构建了东部陆块早前寒武纪地质年代学格架(Wan *et al.*, 2014b; Bai *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015)。但是,对于华北克拉通东部新太古代末期基底形成的地球动力学及构造背景存在着较大的争议,部分学者认为华北克拉通在约 2.50 Ga 并不存在大规模的俯冲作用,构造岩浆事件可能是地幔柱构造控制下的结果(翟明国, 2012; 张瑞英等, 2013);另有学者认为华北克拉通东部在新太古代

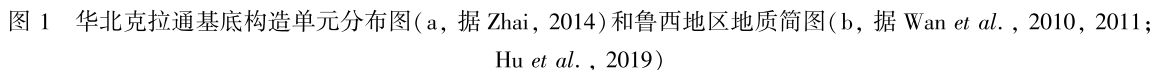
晚期发育与板块俯冲相关的表壳岩、变质火山岩和深成侵入岩组合,其形成于俯冲背景下的活动大陆边缘环境(Bai *et al.*, 2015, 2016; Fu *et al.*, 2017, 2018, 2019, 2021; 王伟等, 2017; 王惠初等, 2018)。

根据以往资料分析来看,新太古代晚期-古元古代早期的华北克拉通东部陆块岩浆活动主要是由富钠花岗岩逐渐向富钾花岗岩(包括二长花岗岩类和钾质花岗岩)发育演化(Fu *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2019a)。作为太古宙克拉通最终稳定的产物,富钾花岗岩为深入探讨新太古代晚期大陆地壳的形成与演化过程提供了重要依据。

鲁西花岗岩-绿岩带是华北克拉通东部前寒武纪一个重要的结晶基底,以发育约 2.7 Ga 和约 2.50 Ga 的构造热事件为主要特征,并保留了 2.70~2.50 Ga 完整的地质特征和多期次的花岗质侵入岩记录(万渝生等, 2017; Hu *et al.*, 2019),是华北克拉通东部开展早前寒武纪地壳构造演化研究的热点区域。基于此,本文对鲁西地区徂徕山南部至宫里镇一带的二长花岗岩进行岩石学、U-Pb 年代学和岩石地球化学分析,系统讨论富钾花岗岩的形成时代、岩石成因、地球动力学背景,进而为华北克拉通东部鲁西地块的形成及演化提供直接的证据。

1 地质背景

鲁西地区是华北克拉通东部陆块出露面积最大的太古宙结晶基底之一(图1a),总出露面积大于 10 000 km²。区内发育多期次的新太古代变质侵入岩(TTG 片麻岩和花岗岩类)和变质表壳岩(泰山岩群),共同构成了北东-南西向展布的鲁西花岗岩-绿岩带,东至沂水地区被郯庐断裂带所截切(张超等, 2017)(图1b)。已有研究表明,鲁西地区发育新太



古代早期(2.75~2.60 Ga)和新太古代晚期(2.60~2.50 Ga)两期次的地质演化阶段(万渝生等, 2012, 2017; Wan *et al.*, 2014b)。前人根据鲁西地区的岩石组合类型、成因及年代学证据, 自东北向西南依次划分为A、B、C的3个带(图1b): A带主要由新太古代晚期(2 530~2 490 Ma)的壳源花岗岩组成, 同时包含2.54~2.50 Ga的花岗闪长岩、正长花岗岩、二长花岗岩和2.58~2.47 Ga的混合岩, 发育2.56~2.50 Ga

的变质表壳岩类(Wan *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2017); B 带主要发育新太古代早期(2 750~2 600 Ma) 的 TTG 片麻岩类(奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩)和变质表壳岩,同时也包含 2.54~2.50 Ga 的花岗岩(Wang *et al.*, 2016a, 2016b); C 带由新太古代晚期(2 550~2 500 Ma) 岩石组成,主要是花岗闪长岩为主的 TTG、辉长岩、石英闪长岩、富钾花岗岩(二长花岗岩和正长花岗岩),还有一些辉石岩(Gao

et al., 2018; 王跃等, 2022)。

徂徕山南部-宫里镇研究区位于鲁西 C 带中, 向北西方向延伸到泰山地区, 主体地质体为新太古代晚期变质侵入岩, 由片麻状二长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩及少量英云闪长质片麻岩类 TTG 岩石组成。二长花岗岩岩体出露广泛, 多呈不规则岩株状、脉状或枝脉状侵入于 TTG 片麻岩中, 岩体内可见少量泰山岩群表壳岩捕虏体存在。在与 TTG 片麻岩接触带附近, 二长花岗岩显示片麻状构造, 片麻理走向 315°, 与北西向的区域构造线方向一致。

2 岩石学特征

本文在鲁西地区西南部 C 带徂徕山南部至宫里镇一带采集了 7 件二长花岗岩样品(图 1b)。在宏

观露头尺度上, 岩石表面呈浅灰色-灰红色, 中粒花岗岩变晶结构, 块状构造(图 2a), 岩石内部可见细小石英脉侵入, 局部显示弱片麻状构造, 走向 340°, 与区域构造线方向一致(图 2b)。对 7 件样品进行显微镜下观察, 选取典型岩石拍照如图 2c 和图 2d, 样品矿物种类及含量接近, 主要矿物成分为微斜长石(25%~45%)、斜长石(25%~35%)、石英(20%~30%)和黑云母(5%~15%), 副矿物包含锆石和少量不透明矿物。其中, 微斜长石呈半自形-他形板状、粒状, 格子双晶发育; 斜长石呈半自形板状, 具轻微绢云母化、土化和局部绿帘石化蚀变, 表面浑浊不净, 局部可见聚片双晶; 石英呈他形粒状, 分布均匀; 黑云母呈褐色、浅黄-黄褐色, 呈不连续的片状定向-半定向排列分布于上述矿物之间。

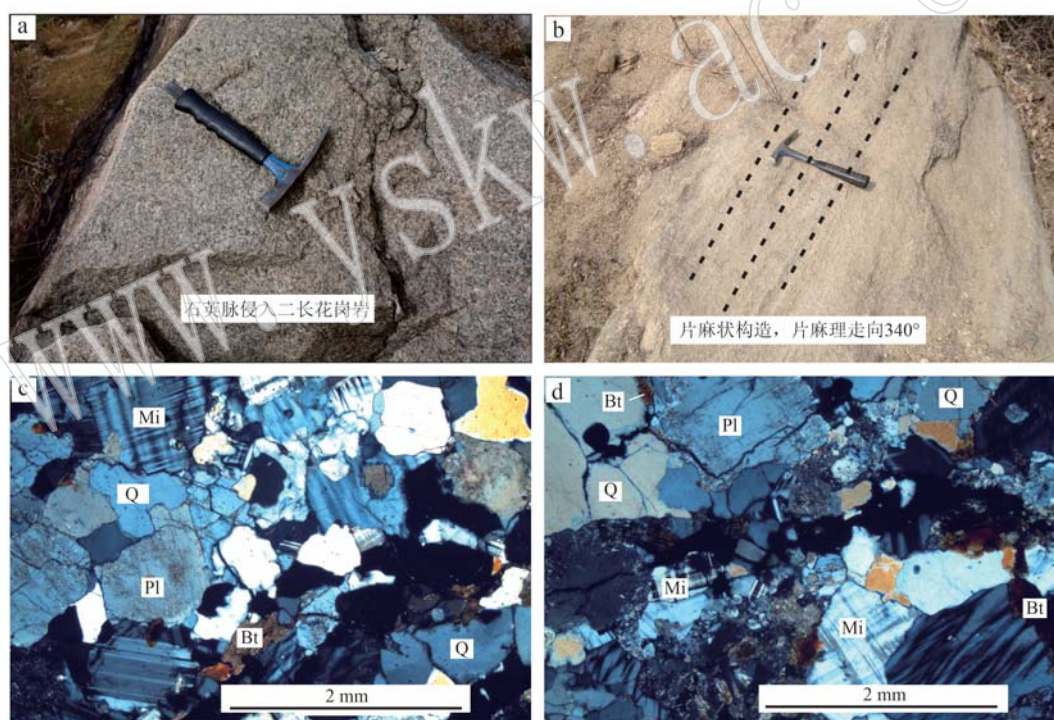


图 2 鲁西二长花岗岩野外(a,b)及镜下(c,d)照片

Fig. 2 Closeup outcrop photographs (a, b) and photomicrographs (c, d) of the monzogranites in western Shandong

Bt—黑云母; Mi—微斜长石; Pl—斜长石; Q—石英

Bt—biotite; Mi—microcline; Pl—plagioclase; Q—quartz

3 实验测试方法

花岗岩主量元素的分析测试由山东省第一地质矿产勘查院实验室采用荧光光谱法在 AxiosmAX 型

波长色散-X 射线荧光光谱仪(XRF)上完成, 分析误差低于 5%。微量元素的分析测试由山东省物化探勘查院岩矿测试中心采用 NexION 300D 型电感耦合等离子体质谱仪完成, 相对标准偏差低于 5%。

U-Pb 同位素定年分析在中国冶金地质总局山

东局测试中心实验室完成,采用 MonoCL3 系统对锆石进行 CL 结构显微观察,激光剥蚀系统为 GeoLas Pro, ICP-MS 型号为 ThermoFisher 公司生产的 iCAPQ,仪器的详细参数及操作步骤参考李艳广等(2015)。数据处理由 ICP MS datacal 软件完成(Liu *et al.*, 2008)。应用 ISOPLOT 3.0 程序进行锆石年龄加权平均值计算及 U-Pb 谐和图的绘制(Ludwig,

2003)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

本文选取 1 件二长花岗岩(D6525-Z1)进行了 U-Pb 年龄测定,详细数据如表 1 所示。岩石中锆石

表 1 二长花岗岩样品(D6525-Z1) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of monzogranite(D6525-Z1)

点位	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma						Con.
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\sigma$	
1	511	569	0.898 8	0.146 1	0.0036	5.1825	0.1510	0.255 9	0.005 3	2 301	42	1 850	25	1 469	27	77%
2	54	81	0.659 3	0.157 2	0.004 2	9.921 7	0.265 1	0.456 6	0.008 6	2 428	46	2 428	25	2 424	38	99%
3	134	212	0.630 8	0.157 6	0.003 3	9.950 9	0.234 5	0.454 8	0.006 7	2 429	35	2 430	22	2 417	30	99%
4	215	325	0.659 4	0.156 7	0.003 3	9.801 7	0.236 5	0.449 5	0.006 9	2 420	37	2 416	22	2 393	31	99%
5	168	1 569	0.107 2	0.155 8	0.002 9	6.328 6	0.128 6	0.291 9	0.004 2	2 410	32	2 022	18	1 651	21	79%
6	409	1 641	0.249 2	0.136 4	0.002 5	2.278 6	0.047 2	0.119 8	0.001 6	2 183	32	1 206	15	730	9	50%
7	260	334	0.779 6	0.158 5	0.003 1	10.365 5	0.241 4	0.469 5	0.008 6	2 440	33	2 468	22	2 481	38	99%
8	235	397	0.592 2	0.178 9	0.003 5	11.441 0	0.230 8	0.458 6	0.006 7	2 642	33	2 560	19	2 433	29	94%
9	116	200	0.580 0	0.157 4	0.003 8	10.052 3	0.241 9	0.458 1	0.007 6	2 428	41	2 440	22	2 431	34	99%
10	204	270	0.757 4	0.161 8	0.003 2	10.536 3	0.244 9	0.466 8	0.008 2	2 476	34	2 483	22	2 469	36	99%
11	184	253	0.728 5	0.161 6	0.003 0	10.466 2	0.195 1	0.465 2	0.005 9	2 472	31	2 477	17	2 463	26	99%
12	189	204	0.928 1	0.160 7	0.003 0	10.428 2	0.212 7	0.466 2	0.006 6	2 463	31	2 474	19	2 467	29	99%
13	155	219	0.705 8	0.161 2	0.002 8	10.454 1	0.195 5	0.465 9	0.006 1	2 468	30	2 476	17	2 465	27	99%
14	92	183	0.502 7	0.161 4	0.003 6	10.484 7	0.255 1	0.467 0	0.007 5	2 470	39	2 479	23	2 470	33	99%
15	396	1 010	0.392 3	0.140 0	0.002 6	3.052 3	0.064 6	0.157 1	0.002 3	2 228	32	1 421	16	941	13	59%
16	174	310	0.562 2	0.161 0	0.003 6	9.693 8	0.225 1	0.434 1	0.007 7	2 466	37	2 406	21	2 324	35	96%
17	282	434	0.650 1	0.160 6	0.003 7	7.944 7	0.223 2	0.358 0	0.009 1	2 462	40	2 225	25	1 973	43	87%
18	91	114	0.804 2	0.166 2	0.004 3	10.949 4	0.297 1	0.476 0	0.008 2	2 520	45	2 519	25	2 510	36	99%
19	140	932	0.149 9	0.137 6	0.002 6	3.044 3	0.112 7	0.158 9	0.005 1	2 198	33	1 419	28	951	28	60%
20	78	130	0.603 4	0.165 2	0.003 4	10.868 3	0.233 7	0.474 6	0.007 1	2 510	34	2 512	20	2 504	31	99%
21	179	273	0.655 3	0.163 7	0.002 8	10.557 0	0.269 1	0.463 9	0.009 9	2 495	29	2 485	24	2 457	44	98%
22	203	344	0.590 7	0.159 6	0.003 0	8.564 7	0.178 8	0.386 1	0.005 9	2 451	31	2 293	19	2 105	28	91%
23	122	1 056	0.116 0	0.140 6	0.002 8	3.052 7	0.114 9	0.155 5	0.004 9	2 235	35	1 421	29	932	27	58%
24	143	225	0.636 4	0.161 6	0.003 2	10.524 6	0.205 9	0.469 6	0.008 5	2 473	34	2 482	18	2 482	37	99%
25	131	183	0.717 1	0.159 8	0.004 1	10.105 4	0.213 4	0.455 3	0.008 9	2 453	43	2 444	20	2 419	40	98%

颗粒主要呈短柱状、长柱状,自形程度较好,粒径多在 100~200 μm 之间。锆石 CL 图像显示,多数锆石颜色较深,发育振荡环带,少量锆石具有核边结构(图 3a),锆石 Th/U 值多在 0.50~1.90 之间,上述特征表明其属于典型的岩浆成因锆石。对 20 颗锆石进行了 25 个数据点分析,数据点 8 给出了最古老的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,为 $2\,642\pm 33$ Ma,解释为继承锆石的结晶年龄。剩余年龄点普遍存在 Pb 丢失现象,且大致在不一致线上,其上交点年龄为 $2\,479\pm 11$ Ma (MSWD=1.2),认为其可能代表了岩石形成时代,

也就是岩浆作用的时间。

4.2 主量元素地球化学特征

主量、微量元素测试结果见表 2。7 件二长花岗岩样品 SiO_2 含量在 67.60%~74.64% 之间,平均为 72.15%; Al_2O_3 含量在 12.55%~16.76% 之间,平均为 14.18%; Na_2O 含量在 3.08%~5.98% 之间,平均为 4.06%; K_2O 含量在 2.81%~5.64% 之间,变化范围较大,平均为 4.45%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值平均为 1.16; CaO 含量在 0.71%~2.02% 之间,平均为 1.36%; MgO 含量低,介于 0.19%~0.65% 之间,平均为 0.44%,

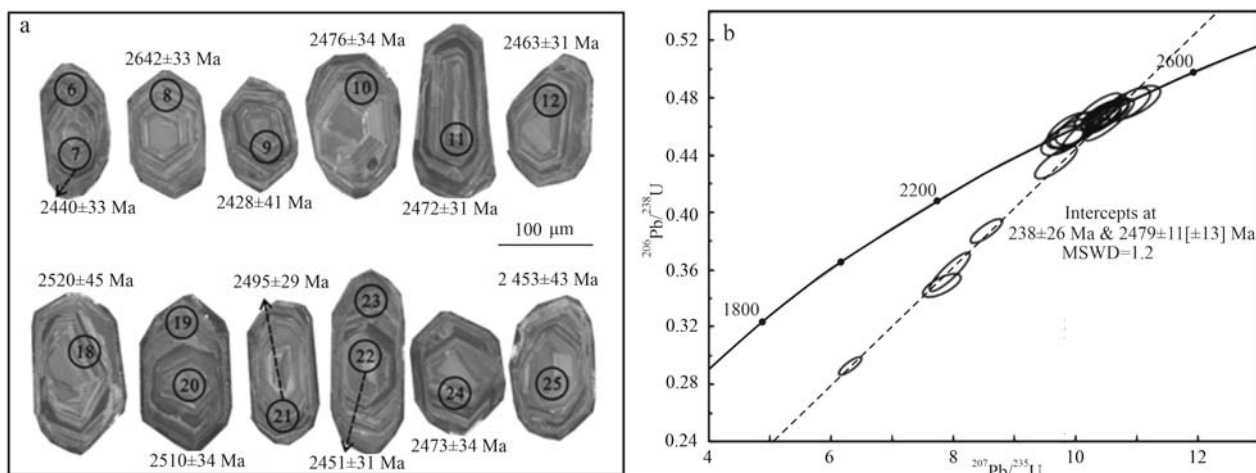


图3 鲁西二长花岗岩代表性锆石 CL 图像(a) 和锆石 U-Pb 年龄图(b)

Fig. 3 CL images of representative zircon grains (a) and zircon U-Pb age diagram (b) from monzogranites in western Shandong

$\text{Mg}^\#$ 值介于13~27之间,平均值为20; TiO_2 含量在0.12%~0.26%之间,平均为0.19%。岩石整体相对富Si、Na、K、Al,贫Ca、Ti、Mg。在TAS图解中,多数样品点落入花岗岩区域(图4a);在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 判别图(图4b)中,样品投点均落入高钾钙碱性岩系列。样品的A/CNK值在0.94~1.10之间,平均为1.01,在A/NK-A/CNK图(图4c)中,显示出准铝质-弱过铝质特征。岩石总体呈现弱过铝质、富硅、高钾钙碱性侵入岩的特征。

4.3 微量元素地球化学特征

二长花岗岩稀土元素总量介于 36.92×10^{-6} ~ 175.26×10^{-6} 之间,变化范围较大,平均值为 93.61×10^{-6} ,含量整体偏低。轻稀土元素含量为 35.15×10^{-6} ~ 171.15×10^{-6} ,平均值 89.93×10^{-6} ,重稀土元素含量为 1.77×10^{-6} ~ 5.73×10^{-6} ,平均值 3.68×10^{-6} 。轻重稀土元素比值为11.72~41.64。Eu异常变化大,其中2件样品呈弱负Eu异常, δEu 介于0.60~0.66之间,另外5件样品具弱正Eu异常, δEu 介于1.0~1.72之间。岩石整体显示富集Rb、Ba、K、Sr等大离子亲石元素,亏损Nb、Ta、P、Ti等高场强元素的特征(图5a),与区域上约2.70 Ga的TTG岩石相似;稀土元素配分曲线整体呈轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的向右缓倾分布趋势,二长花岗岩基本落在区域上约2.70 Ga的TTG岩石区域(Wan *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2019b)。

5 讨论

5.1 U-Pb 年代学意义

片麻状二长花岗岩样品(D6525-Z1)的锆石年龄主要介于2642~2420 Ma之间,结合区域地质背景,认为其能够反映该区岩浆作用演化信息。

继承锆石年龄 2642 ± 33 Ma代表了早期一次部分熔融事件的时间。鲁西地区广泛发育新太古代中期2.65~2.60 Ga的TTG片麻岩和侵入2.70 Ga侵入体的深熔浅色脉体,尤其以泰山东侧上港-新甫山一带TTG片麻岩最为典型,并且保留了大量约2.60 Ga的变质记录(杜利林等, 2005)。例如,新泰市孟家屯村西条带状英云闪长质片麻岩锆石内核U-Pb年龄为2720~2709 Ma,锆石外圈测得变质增生边年龄 2624 ± 11 Ma(杜利林等, 2003);泰山栗杭一带英云闪长质片麻岩中浅色奥长花岗岩脉体锆石内核U-Pb年龄为 2620 ± 16 Ma(王世进等, 2008, 2012)。因此,本次样品中最古老的锆石年龄代表了区域上一次重要岩浆事件的记录。

岩石中约2.50 Ga(2510 ± 34 Ma和 2520 ± 45 Ma)的锆石年龄反映的是鲁西地区一次强烈的岩浆作用活动时间,这与鲁西泰山、沂水、蒙山地区乃至整个华北克拉通岩浆热作用事件记录相一致。例如泰山北侧傲徕山二长花岗岩时代为 2507 ± 27 Ma

表 2 鲁西二长花岗岩主量元素 ($w_B/\%$)、微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements result of the monzogranites in western Shandong

样品编号	D5009-Z1	PM5-19-Z1	PM5-26-Z1	D8042-Z1	PM9-1-Z1	D6425-Z1	D6426-Z1
SiO ₂	74.64	71.76	74.39	72.46	71.38	67.60	72.81
TiO ₂	0.12	0.24	0.20	0.26	0.19	0.14	0.19
Al ₂ O ₃	13.60	13.87	12.55	13.47	14.66	16.76	14.32
TF ₂ O ₃	1.60	2.38	1.59	2.62	2.09	2.56	1.89
MnO	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02
MgO	0.19	0.65	0.22	0.42	0.42	0.78	0.40
CaO	0.87	1.65	0.71	1.19	1.79	1.26	2.02
Na ₂ O	3.76	3.08	3.68	3.92	4.31	5.98	3.68
K ₂ O	5.64	4.33	4.71	5.31	3.63	2.81	4.71
P ₂ O ₅	0.10	0.17	0.13	0.18	0.15	0.16	0.14
LOI	0.15	1.10	0.26	0.82	0.64	1.10	0.01
K ₂ O/Na ₂ O	1.50	1.41	1.28	1.35	0.84	0.47	1.28
σ	2.80	1.90	2.23	2.36	3.36	1.20	2.21
A/CNK	0.98	1.09	1.01	0.94	1.03	1.10	0.96
A/NK	1.11	1.42	1.12	1.10	1.33	1.30	1.28
Mg [#]	13	27	14	17	20	27	20
Pb	19.00	15.40	26.40	16.50	8.40	4.63	16.40
Cr	3.67	11.20	3.30	5.04	25.40	7.00	4.84
Ni	1.96	5.83	2.77	2.95	13.00	5.00	2.89
Co	1.16	3.43	1.22	1.92	4.20	4.06	3.20
Rb	174.00	122.10	128.20	132.00	98.70	17.30	140.00
Sr	268.00	264.60	151.30	244.50	588.20	603.00	373.90
Ba	779.00	853.30	667.70	919.70	1 325.2	284.00	660.60
Nb	2.59	2.77	2.00	4.07	9.80	1.70	5.20
Ta	0.17	0.15	0.09	0.20	0.52	0.07	0.78
Zr	79.10	152.60	158.00	165.10	111.70	56.00	93.00
Hf	2.38	3.80	4.40	3.90	3.10	1.29	2.50
V	6.68	16.10	9.34	12.00	31.30	14.30	22.40
Th	6.75	9.78	21.97	10.43	3.81	0.65	6.79
La	9.42	22.60	36.40	47.40	14.70	5.96	13.20
Ce	17.50	48.90	97.30	69.90	29.70	11.60	30.50
Pr	1.62	4.10	7.72	8.10	3.50	1.17	2.90
Nd	5.54	12.20	25.90	24.10	13.30	4.31	11.80
Sm	0.77	1.40	3.28	3.40	2.90	0.75	2.00
Eu	0.30	0.45	0.55	0.63	0.85	0.36	0.60
Gd	0.55	0.98	2.14	2.15	2.10	0.47	1.40
Tb	0.09	0.13	0.25	0.28	0.28	0.07	0.20
Dy	0.37	0.41	0.71	0.94	0.94	0.34	0.80
Ho	0.09	0.09	0.12	0.16	0.15	0.07	0.17
Er	0.23	0.30	0.41	0.52	0.40	0.21	0.49
Tm	0.05	0.04	0.05	0.07	0.05	0.03	0.09
Yb	0.33	0.30	0.37	0.46	0.33	0.21	0.51
Lu	0.06	0.04	0.06	0.08	0.04	0.03	0.08
Y	2.77	2.74	3.10	4.80	5.27	1.83	4.65
LREE/HREE	19.82	39.17	41.64	11.72	16.33	14.91	32.95
δ Eu	1.33	1.12	0.60	0.66	1.00	1.72	1.03
δ Ce	1.01	1.15	1.35	0.80	0.98	1.01	1.16
(La/Yb) _N	20.23	54.04	69.81	73.91	31.57	20.36	18.57

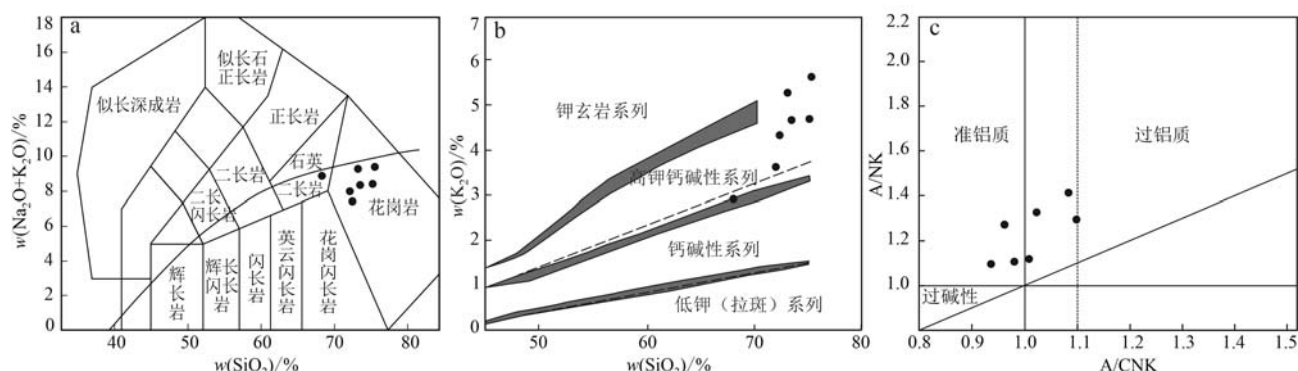


图4 鲁西徂徕山二长花岗岩 TAS 图解(a)、 K_2O-SiO_2 图解(b)和 $A/NK-A/CNK$ 图解(c)(a,b 据 Rickwood, 1989; c 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 4 TAS diagram (a), K_2O-SiO_2 diagram (b) and $A/NK-A/CNK$ diagram (c) of monzogranites from Culai Mountain in western Shandong Province (diagram a and b modified after Rickwood, 1989; diagram c modified after Maniar and Piccoli, 1989)

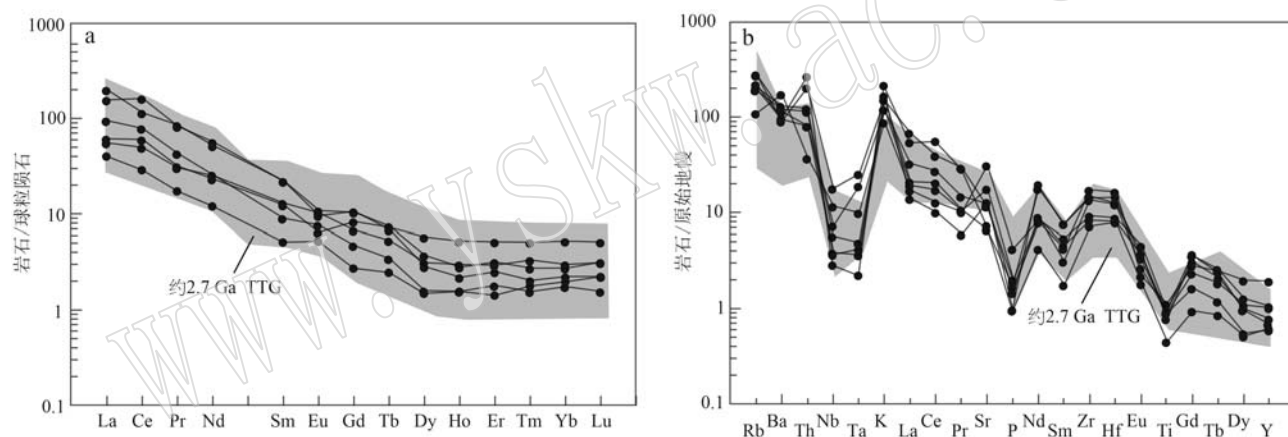


图5 鲁西徂徕山二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石和原始地幔标准化来自 Sun and McDonough, 1989; 约 2.70 Ga TTG 岩石来自 Wan *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2019b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) for the monzogranites in western Shandong (chondrite and primitive mantle normalization factors are from Sun and McDonough, 1989; about 2.70 Ga TTG rocks are from Wan *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2019b)

(Wan *et al.*, 2010); 徂徕山二长花岗岩时代为 2525 ± 18 Ma (靳立杰等, 2017); 泰山地区未变形或弱变形的二长花岗岩形成于 $2.52 \sim 2.50$ Ga (陆松年等, 2008)。大量约 2.50 Ga 的岩浆活动记录, 也说明了这是鲁西地区主要的地质热事件, 可能是新太古代末期向古元古代过渡时地壳重新活动加剧的反映 (靳立杰等, 2017)。

岩石的上交点年龄 2479 ± 11 Ma (MSWD = 1.2) 可能代表了徂徕山二长花岗岩岩浆作用的时间, 并且与区域上深熔作用联系密切。野外地质和年代学的进一步研究显示, 与鲁西大面积花岗岩时空关系

最密切的岩石类型是混合岩, 鲁西多地可见花岗岩侵入或捕虏混合岩, 在本次研究区的东部即可见片麻状二长花岗岩侵入由深熔作用形成的条带状英云闪长质片麻岩和混合岩; 另一方面混合岩中锆石记录的区域变质深熔作用时间为约 2.50 Ga, 与花岗岩的形成近同时或稍早 (王伟, 2017)。例如, 鲁西地块东部地区的高钾花岗岩侵位于 $2511 \sim 2497$ Ma, 辉长-闪长岩侵位于约 2511 Ma, 并在 $2475 \sim 2451$ Ma 发生了区域变质作用 (Gao *et al.*, 2018); 沂水大山地区混合岩变质深熔年龄为 2475 ± 14 Ma (毛永生等, 2015); 胶北 TTG 片麻岩原岩形成时代 $2912 \pm$

6 Ma, 在 2488 ± 9 Ma 发生深熔作用, 并伴有同期基性岩侵入 (Wang *et al.*, 2014); 辽北清原 TTG 和表壳岩系形成于 2.56~2.51 Ga, 变质于 2.49~2.48 Ga (Wang *et al.*, 2016a; 袁玲玲等, 2020)。在鲁西七星台地区, 变粒岩-含脉变粒岩-混合岩-黑云母二长花岗岩的连续变化剖面也表明二长花岗岩是陆壳深熔作用进一步发展的结果 (王伟, 2010)。因此, 约 2.48 Ga 的年龄不仅代表了徂徕山二长花岗岩的形成时代, 还可能约束了徂徕山地区深熔作用的时限。

本文和已有的年代学数据表明, 一方面鲁西徂徕山地区约 2.50 Ga 二长花岗岩的岩浆活动年代学记录与华北克拉通最强烈的新太古代晚期岩浆事件时间一致, 另一方面二长花岗岩中记录的区域深熔作用的时间为约 2.48 Ga, 这与华北克拉通东部已知的冀东、辽西、清源绿岩带和胶北地体中获得的变质作用时间 2.50~2.45 Ga 也是一致的 (Grant *et al.*, 2009; Nutman *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2014; 王伟等, 2017; 刘建辉, 2022)。因此, 鲁西徂徕山地区二长花岗岩是华北克拉通新太古代晚期-古元古代早期岩浆作用形成的代表性岩石之一, 其记录的太古宙岩浆作用和变质作用时限均可与华北克拉通东部对比, 进一步补充了鲁西花岗岩年龄库。

5.2 岩石成因

徂徕山二长花岗岩总体呈现高钾钙碱性、准铝

质-弱过铝质特征 (图 4b、4c)。另外, 岩石富集 Rb、K、Zr 和 Hf 元素, 明显亏损 Ba、Nb、Ta、Ti 和 P 元素, 具有高 Sr ($140.9 \times 10^{-6} \sim 653.3 \times 10^{-6}$)、低 Y ($2.74 \times 10^{-6} \sim 8.90 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($0.22 \times 10^{-6} \sim 0.89 \times 10^{-6}$) 含量、高 Sr/Y 值 (16~182) 和高 La/Yb 值 (16~103) 的特征, 缺少 Eu 负异常的特征, 与埃达克质岩石的地球化学特征相似 (张旗等, 2003)。在 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 与 Sr/Y-Y 判别图解中, 岩石均落入埃达克岩区内, 也与鲁西 C 带二长花岗岩特征一致 (图 6)。重稀土元素明显亏损说明岩石残留相可能含有石榴子石; 稀土元素配分曲线显示重稀土元素向右缓倾斜 (图 5b), Y/Yb 值为 8.29~16.65 (平均 10.27), $(Ho/Yb)_N$ 值为 0.78~7.38, 平均 1.05, 也暗示其残留相主要为石榴子石; Sr 元素含量较高且 Eu 异常不明显, 暗示斜长石不是其残留相的主要矿物; 元素 Nb、Ta 亏损, 呈明显的负异常, 指示其残留相中也可能含有金红石或角闪石等富钛矿物 (Wang *et al.*, 2020)。

然而, 鲁西徂徕山二长花岗岩呈现高 SiO_2 、 K_2O 含量, 低 MgO、Cr、Ni 含量以及低 $Mg^\#$ 值的特征, 与俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩明显不符 (Zhang *et al.*, 2010)。岩石中 Eu 负异常不明显, 暗示其可能不是幔源玄武质岩浆分离结晶与同化混染的产物。

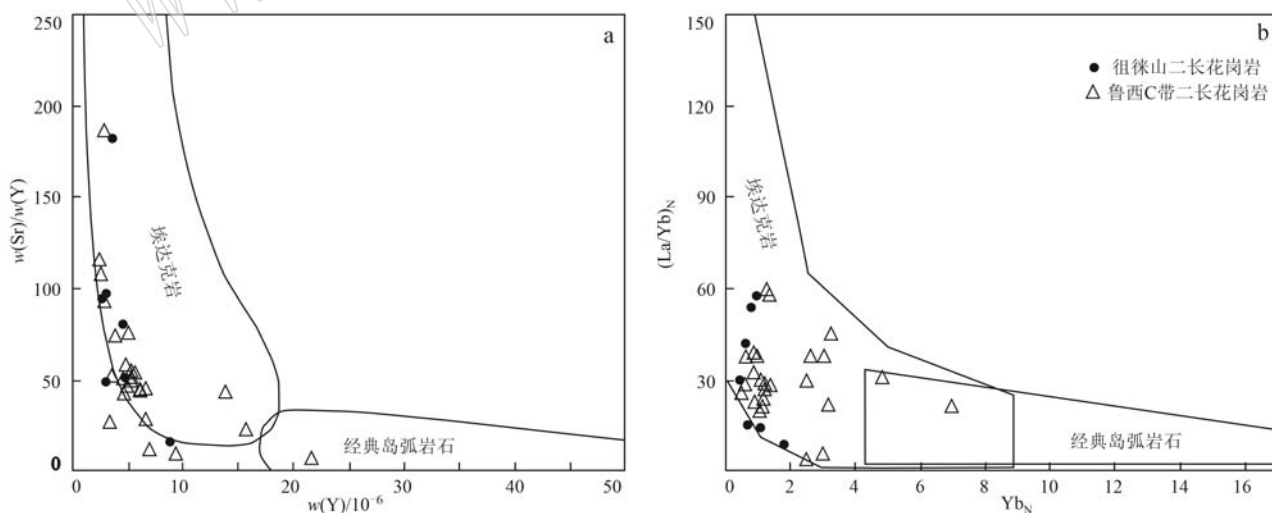


图6 鲁西地区二长花岗岩 Sr/Y-Y(a) 和 $(La/Yb)_N$ - Yb_N (b) 图解 (底图据 Defant and Drummond, 1990; 鲁西 C 带二长花岗岩数据引自 Peng *et al.*, 2013a; 王跃等, 2022; 杨帆等, 2022; 张振飞等, 2023)

Fig. 6 Sr/Y-Y (a) and $(La/Yb)_N$ - Yb_N (b) diagrams of monzogranite in western Shandong Province (after Defant and Drummond, 1990; monzogranites from C zone after Peng *et al.*, 2013a; Wang Yue *et al.*, 2022; Yang Fan *et al.*, 2022; Zhang Zhenfei *et al.*, 2023)

由此看来,徂徕山二长花岗岩更可能来源于增厚或拆沉下地壳的部分熔融。由拆沉下地壳部分熔融起源的埃达克岩往往表现出低 SiO_2 、 Mg 和 Ni 而 Cr 元素含量较高的特征,这是因为岩浆熔体在上涌过程中必然会与地幔物质发生一定程度的熔体-岩石相互作用(Martin *et al.*, 2005; 马玉波等, 2022)。与拆沉下地壳部分熔融成因相比,徂徕山二长花岗岩相对富 SiO_2 、 MgO 、 Cr 、 Ni 含量,而 V 含量较低,其更可能是加厚下地壳部分熔融的产物(Wang *et al.*, 2006)。

前人研究表明,华北克拉通约 2.50 Ga 壳源花岗质岩石的全岩 Nd 同位素模式年龄和锆石 Hf 同位素模式年龄结果显示其峰期均介于 2.90~2.70 Ga 之间,暗示华北克拉通约 2.50 Ga 的地壳可能来自于中-新太古代早期新生地壳的重熔或再造作用(Geng *et al.*, 2012; Wan *et al.*, 2014b; Gao *et al.*, 2019)。鲁西西南部地区二长花岗岩锆石 Hf 同位素组成显示其主体是由约 2.70 Ga 的 TTG 类岩石熔融形成(杨帆等, 2022; 王跃等, 2022)。徂徕山二长花岗岩中含有早期 2766~2611 Ma 的捕获锆石,也说明岩石形成时存在约 2.70 Ga 壳源物质重熔、混入(靳立杰等, 2017)。本文徂徕山二长花岗岩轻重稀土元素分馏明显,类似于区域上约 2.70 Ga TTG 类岩石的稀土元素配分模式(图 5b)。在 $3\text{CaO}-(\text{TFeO}+\text{MgO})-5\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 关系图(图 7)中,

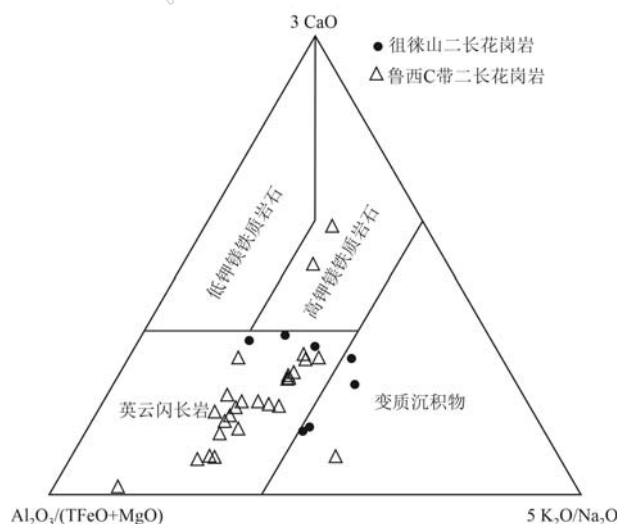


图 7 鲁西徂徕山二长花岗源岩判别图(据 Laurent *et al.*, 2014)

Fig. 7 Petrogenetic discrimination diagrams of monzogranites from Culai Mountain in western Shandong Province(after Laurent *et al.*, 2014)

样品点主要落入英云闪长岩附近。由此,本文认为徂徕山二长花岗岩来源于约 2.70 Ga 加厚下地壳(英云闪长质 TTG 岩石)的部分重熔。

5.3 地球动力学背景

关于华北克拉通东部新太古代基底岩石形成的构造背景一直存在着争议。部分学者依据逆时针的 P - T - t 变质轨迹、约 2.70 Ga 科马提岩以及区域上的约 2.50 Ga 花岗岩类的穹隆构造,认为华北克拉通东部在新太古代末期处于地幔柱活动的构造背景(Zhao *et al.*, 2001, 2005; Yang *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2014)。随着研究的深入,越来越多的证据表明,华北克拉通东部新太古代末期基底岩石更可能是形成于与俯冲相关的岛弧岩浆作用背景(Guo *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015; Fu *et al.*, 2017, 2021; Yang *et al.*, 2020)。例如,郝乐燃等(2020)对华北克拉通东部陆块辽西-辽南地区新太古代花岗质岩石开展系统性研究,认为其形成于板块俯冲背景下的弧构造环境;Li 等(2016)揭示了华北克拉通东部鲁西地区沂水杂岩体岩浆侵位时代为新太古代约 2.50 Ga,指出变质火山岩及辉石岩具有 MORB、IAB、OIB 的特征,形成于俯冲-岛弧的构造环境。此外,区域上滕州-平邑-泰山地区约 2.54~2.52 Ga 的赞岐岩(Wang *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2019a)、泰山-沂水-邹城地区约 2.54 Ga 的高硅埃达克岩(Peng *et al.*, 2012)、泰山地区花岗绿岩带中约 2.54 Ga 的硅质高镁玄武岩(Peng *et al.*, 2013b)进一步指示了鲁西地区俯冲相关的构造背景。

鲁西新太古代晚期(2.60~2.50 Ga)岩浆事件可分为两个阶段:早期(2560~2525 Ma)形成的 TTG 类片麻岩、花岗质岩石等经历了强烈的变质变形作用;晚期(2525~2480 Ma)侵入岩虽具有相似的岩石组合,但均未变形或微弱变形,这种变化指示了鲁西地区构造体制在 2525 Ma 前后发生了由挤压碰撞到伸展构造体制的转变(万渝生等, 2015; Yu *et al.*, 2021),也与整个华北克拉通在约 2.525 Ga 的构造转变的观点一致(Wan *et al.*, 2010, 2014b; Wang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016)。

另外,华北克拉通广泛出露的约 2.50 Ga 花岗质和闪长质岩石普遍具有高钾的特征(Fu *et al.*, 2017, 2018),包括本文研究的徂徕山二长花岗岩,亦属高钾钙碱性岩石系列,而钾质岩石,包括钾质火山岩和富钾的花岗质岩石等,目前均被认为是形成

于弧后、大陆裂谷和碰撞后岩石圈减薄等伸展的构造背景(Zhang *et al.*, 2011; 佟鑫等, 2023; 尹志刚等, 2024)。基于全球不同克拉通 TTG 和钾质花岗岩类岩浆作用的时空演化规律, Laurent 等(2014)提出了类似显生宙的俯冲-碰撞模型, 即认为全球太古宙晚期钾质花岗岩形成于碰撞造山构造环境。在 Rb/10-Hf-3 Ta 图解(图 8)中, 投影点均落入碰撞大地构造背景上的花岗岩区内。考虑徂徕山富钾花岗岩的增厚下地壳源区, 以及肥城-岱岳-邹城地区富钾二长花岗岩形成的伸展环境(杨帆等, 2022; 张振飞等, 2023), 鲁西徂徕山二长花岗岩更可能形成于陆块碰撞造山后伸展的构造背景。此外, 在华北克拉通东部变质地体中, 新太古代末期的麻粒岩相变质作用记录也支持弧-陆或陆-陆的俯冲碰撞的构造模式(Zhao *et al.*, 2001, 2005; Wang *et al.*, 2016a)。

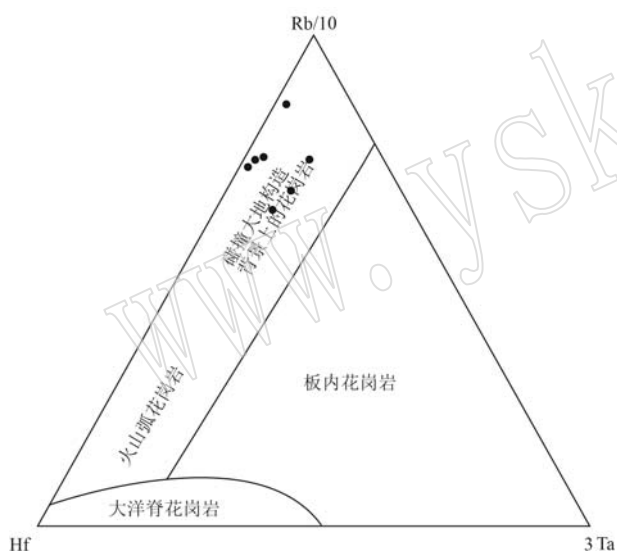


图 8 鲁西二长花岗岩构造环境判别图(底图来自 Harris *et al.*, 1986)

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams of the monzogranites in western Shandong (diagram is from Harris *et al.*, 1986)

大量研究资料表明, 在华北克拉通, 新太古代晚期约 2.50 Ga 富钾花岗岩在鞍本、锦州-绥中、冀东东部、鲁西地区大规模分布, 构成东部古老陆块西缘的富钾花岗岩带, 它们的形成过程被认为与活动大陆边缘的俯冲增生、弧-陆碰撞及碰撞后伸展过程密切相关, 是新太古代晚期板块构造起作用的重要证据(Nutman *et al.*, 2011; Wan *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2022)。已有学者证实在新太古代晚期东部陆块中的胶辽和徐淮微陆块俯冲碰撞拼合为整体(翟

明国, 2011), 并导致鲁西花岗-绿岩带出现了基性岩墙事件和延伸巨大的钾质花岗岩带(侯贵廷等, 2008; Wan *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2019)。前文已表明, 本文研究的二长花岗岩形成于约 2.48 Ga, 同时反映了徂徕山地区一期深熔变质作用, 结合其成因和构造背景, 认为鲁西徂徕山二长花岗岩正是胶辽和徐淮微陆块俯冲碰撞后的产物。

综上所述, 鲁西地区在新太古代由于陆块俯冲作用导致俯冲板片内的岩浆发生了部分熔融, 从而形成了 TTG 岩系; 最终在约 2.525 Ga 俯冲结束, 陆块间发生碰撞, 导致地壳物质在新太古代晚期-古元古代早期后造山时期发生了部分熔融, 产生了钾质花岗岩岩浆; 最后在大陆伸展的背景下钾质花岗岩侵入到绿岩带和相邻的不同微陆块, 并且有部分花岗岩经历了变质作用, 标志着新太古代晚期-古元古代早期鲁西地区微陆块已拼贴完成, 并与其他地区一起构成稳定的华北太古宙克拉通。

6 结论

通过对鲁西徂徕山二长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和岩石地球化学研究, 可以得出如下认识:

(1) 鲁西徂徕山二长花岗岩形成于约 2.48 Ga, 同时约束了徂徕山地区深熔作用的时限。

(2) 鲁西徂徕山二长花岗岩属准铝质-弱过铝质、高钾钙碱性系列岩石; 主要富集轻稀土元素, 显示微弱的负 Eu 异常-正 Eu 异常特征, 富集 Rb、Sr、Ba 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素; 综合对比分析, 其源于约 2.70 Ga 加厚下地壳(英云闪长质 TTG 岩石)的部分重熔。

(3) 鲁西徂徕山二长花岗岩形成于碰撞造山后的伸展环境, 标志着在新太古代晚期-古元古代早期鲁西地区微陆块已拼贴完成, 并与其他地区一起构成稳定的华北太古宙克拉通。

References

- Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 362: 144~146.
- Bai X, Liu S W, Guo R R, *et al.* 2015. Zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemistry of two contrasting Neoproterozoic charnockitic rock series in Eastern Hebei, North China Craton: Implications for petrogenesis and

- tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 267: 72~93.
- Bai X, Liu S W, Guo R R, *et al.* 2016. A neoproterozoic arc-back-arc system in eastern Hebei, North China Craton: Constraints from zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemistry of dioritic-tonalitic-trondhjemitic-granodioritic (DTTG) gneisses and felsic paragneisses[J]. *Precambrian Research*, 273: 90~111.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662~665.
- Du Lilin, Zhuang Yuxun, Yang Chonghui, *et al.* 2003. Characters of zircons in the mengjiatun formation in Xintai of Shandong and their chronological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 359~366(in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Zhuang Yuxun, Yang Chonghui, *et al.* 2005. SHRIMP U-Pb zircon chronology of fine-grained amphibolite in the mengjiatun area, western Shandong[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(5): 429~434 (in Chinese with English abstract).
- Fu J H, Liu S W, Cawood P A, *et al.* 2018. Neoproterozoic magmatic arc in the western Liaoning Province, northern North China Craton: Geochemical and isotopic constraints from sanukitoids and associated granitoids[J]. *Lithos*, 322: 296~311.
- Fu J H, Liu S W, Sun G Z, *et al.* 2021. Two contrasting Neoproterozoic metavolcanic rock suites in eastern Hebei and their geodynamic implications for the northern North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 95: 45~71.
- Fu J H, Liu S W, Wang M J, *et al.* 2017. Late Neoproterozoic monzogranitic-syenogranitic gneisses in the Eastern Hebei-Western Liaoning Province, North China Craton: Petrogenesis and implications for tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 303: 392~413.
- Fu J H, Liu S W, Zhang B, *et al.* 2019. A Neoproterozoic K-rich granitoid belt in the northern North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 328: 193~216.
- Gao L, Liu S W, Sun G Z, *et al.* 2018. Petrogenesis of late Neoproterozoic high-K granitoids in the Western Shandong terrane, North China Craton, and their implications for crust-mantle interactions[J]. *Precambrian Research*, 315: 138~161.
- Gao L, Liu S W, Sun G Z, *et al.* 2019. Neoproterozoic crust-mantle interactions in the Yishui Terrane, south-eastern margin of the North China Craton: Constraints from geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopes of metavolcanic rocks and high-K granitoids[J]. *Gondwana Research*, 65: 97~124.
- Geng Y S, Du L L and Ren L D. 2012. Growth and reworking of the early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes[J]. *Gondwana Research*, 21(2~3): 517~529.
- Geng Yuansheng, Shen Qihan and Ren Liudong. 2010. Late Neoproterozoic to Early Paleoproterozoic magmatic events and tectonothermal systems in the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 1945~1966(in Chinese with English abstract).
- Grant M L, Wilde S A, Wu F Y, *et al.* 2009. The application of zircon cathodoluminescence imaging, Th-U-Pb chemistry and U-Pb ages in interpreting discrete magmatic and high-grade metamorphic events in the North China Craton at the Archean/Proterozoic boundary[J]. *Chemical Geology*, 261(1~2): 155~171.
- Guo R R, Liu S W, Wyman D, *et al.* 2015. Neoproterozoic subduction: A case study of arc volcanic rocks in Qinglong-Zhuzhangzi area of the Eastern Hebei Province, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 264: 36~62.
- Guo Yunpeng, Liu Jianming, Zeng Qingdong, *et al.* 2018. The ~2.5 Ga monzogranite in the Shaolange area of the northern margin of the North China Craton and its geological significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 11~22(in Chinese with English abstract).
- Hao Liran, Yang Debin, Xu Wenliang, *et al.* 2020. Late Neoproterozoic magmatism and crustal growth in northeastern North China Craton: Constraints from zircon U-Pb-Hf isotope, trace elements and whole rock geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(4): 1076~1090(in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Marzouki F M H and Ali S. 1986. The jabel sayid complex, Arabian shield: Geochemical constraints on the origin of peralkaline and related granites[J]. *Journal of the Geological Society*, 143(2): 287~295.
- Hou Guiting, Wang Chuancheng, Wang Yanxin, *et al.* 2008. SHRIMP zircon U-Pb chronology and tectonic significance of the latest neoproterozoic Mengshan diorite, western Shandong Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(1): 22~28(in Chinese with English abstract).
- Hu Y L, Liu S W, Sun G Z, *et al.* 2019. Petrogenesis of the Neoproterozoic granitoids and crustal oxidation states in the Western Shandong Province, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 334: 105446.
- Jiang N, Guo J H, Fan W B, *et al.* 2016. Archean TTGs and sanukitoids from the Jiaobei terrain, North China Craton: Insights into crustal growth and mantle metasomatism[J]. *Precambrian Research*, 281: 656~672.
- Jin Lijie, Zhao Tiquan, Gao Jilei, *et al.* 2017. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating and geological significance of monzonitic granite in aolaishan sequence in Culaishan area in western Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 33(12): 1~5(in Chinese with English abstract).

- Laurent O, Martin H, Moyen J F, *et al.* 2014. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: Evidence for the onset of “modern-style” plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga[J]. *Lithos*, 205: 208~235.
- Li S S, Santosh M, Cen K, *et al.* 2016. Neoproterozoic convergent margin tectonics associated with microblock amalgamation in the North China Craton: Evidence from the Yishui Complex[J]. *Gondwana Research*, 38: 113~131.
- Li Yanguang, Wang Shuangshuang, Liu Minwu, *et al.* 2015. U-Pb dating study of baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2400~2418(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianhui. 2022. Late Neoproterozoic crustal anatexis in the southern Jilin Province: Evidence from metamorphic quartz diorite and associated leucogranite[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(2): 303~321(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- Lu Songnian, Chen Zhihong and Xiang Zhenqun. Chronological Framework of Ancient Intrusive Rock Series in Taishan World Geopark[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1~90(in Chinese).
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley CA, 140.
- Ma Yubo, Zhang Yong, Li Lixing, *et al.* 2022. Orogenic to post-orogenic transition of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt: Constraints from geochronology and geochemistry of the granites in the Qingchengzi area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(10): 2971~2987(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Mao Yongsheng, Peng Toupeng, Fan Weiming, *et al.* 2015. Early pre-Cambrian migmatites in Yishui area of Luxi: Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions and their geological significance[J]. *Geochimica*, 44(6): 517~535(in Chinese with English abstract).
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, *et al.* 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 79(1~2): 1~24.
- Nutman A P, Wan Y S, Du L L, *et al.* 2011. Multistage late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei[J]. *Precambrian Research*, 189(1~2): 43~65.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Peng T P, Fan W M and Peng B X. 2012. Geochronology and geochemistry of late Archean adakitic plutons from the Taishan granite-greenstone Terrain: Implications for tectonic evolution of the eastern North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 208: 53~71.
- Peng T P, Wilde S A, Fan W M, *et al.* 2013a. Late Neoproterozoic potassic high Ba-Sr granites in the Taishan granite-greenstone terrane: Petrogenesis and implications for continental crustal evolution[J]. *Chemical Geology*, 344: 23~41.
- Peng T P, Wilde S A, Fan W M, *et al.* 2013b. Neoproterozoic siliceous high-Mg basalt (SHMB) from the Taishan granite-greenstone terrane, Eastern North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 228: 233~249.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247~263.
- Sun G Z, Liu S W, Gao L, *et al.* 2019a. Neoproterozoic sanukitoids and associated rocks from the Tengzhou-Pingyi intrusive complex, North China Craton: Insights into petrogenesis and crust-mantle interactions[J]. *Gondwana Research*, 68: 50~68.
- Sun G Z, Liu S W, Santosh M, *et al.* 2019b. Thickness and geothermal gradient of Neoproterozoic continental crust: Inference from the southeastern North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 73: 16~31.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tong Xin, Wang Huichu and Zhang Yong. 2023. Neoproterozoic cratonization of the North China Craton: Petrology, zircon chronology and elemental geochemistry of the Changli alkaline granitoids in eastern Hebei, North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(9): 2598~2618(in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Ren Peng, *et al.* 2017. Spatial and temporal distribution, compositional characteristics and formation and evolution of Archean TTG rocks in the North China Craton: A synthesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1405~1419(in Chinese with English abstract).
- Wan Y S, Dong C Y, Wang S J, *et al.* 2014a. Middle neoproterozoic magmatism in western Shandong, North China Craton: SHRIMP zircon dating and LA-ICP-MS Hf isotope analysis[J]. *Precambrian Research*, 255: 865~884.
- Wan Y S, Liu D Y, Nutman A, *et al.* 2012. Multiple 3.8~3.1 Ga tectono-magmatic events in a newly discovered area of ancient rocks (the Shengouzi Complex), Anshan, North China Craton[J]. *Journal of*

- Asian Earth Sciences, 54: 18~30.
- Wan Y, Liu D, Wang S, *et al.* 2010. Juvenile magmatism and crustal recycling at the end of the Neoproterozoic in Western Shandong Province, North China Craton: Evidence from SHRIMP zircon dating [J]. American Journal of Science, 310(10): 1 503~1 552.
- Wan Y S, Liu D Y, Wang S J, *et al.* 2011. 2.7 Ga juvenile crust formation in the North China Craton (Taishan-Xintai area, western Shandong Province): Further evidence of an understated event from U-Pb dating and Hf isotopic composition of zircon [J]. Precambrian Research, 186(1~4): 169~180.
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Wang Shijin, *et al.* 2012. Redefinition of Early Precambrian supracrustal rocks and formation age of BIF in western Shandong, North China Craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 28(11): 3 457~3 475 (in Chinese with English abstract).
- Wan Y S, Liu S J, Xie H Q, *et al.* 2018. Formation and evolution of the Archean continental crust of China: A review [J]. China Geology, 1(1): 109~136.
- Wan Yusheng, Wang Shijin, Ren Peng, *et al.* 2015. Neoproterozoic magmatism in the Culaishan area, western Shandong: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating [J]. Acta Geoscientia Sinica, 36(5): 634~646 (in Chinese with English abstract).
- Wan Y S, Xie S W, Yang C H, *et al.* 2014b. Early neoproterozoic (~2.7 Ga) tectono-thermal events in the North China Craton: A synthesis [J]. Precambrian Research, 247: 45~63.
- Wang C, Song S G, Su L, *et al.* 2022. Crustal maturation and cratonization in response to Neoproterozoic continental collision: The Suizhong granitic belt, North China Craton [J]. Precambrian Research, 377: 106732.
- Wang Huichu, Kang Jianli, Xiao Zhibin, *et al.* 2018. Neoproterozoic subduction in North China Craton: New evidence from the metamorphic high-Mg igneous assemblage in Yunmengshan area, Shanxi Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 34(4): 1 099~1 118 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Hao L L, Zhang X Z, *et al.* 2020. Adakitic rocks at convergent plate boundaries: Compositions and petrogenesis [J]. Science China Earth Sciences, 63(12): 1 992~2 016.
- Wang Q, Xu J F, Jian P, *et al.* 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization [J]. Journal of Petrology, 47(1): 119~144.
- Wang Shijin, Wan Yusheng, Yang Enxiu, *et al.* 2012. Mid neoproterozoic magmatism in western Shandong Province-Evidence of zircon SHRIMP U-Pb dating in Xinfushan and Shanggang rock [J]. Shandong Land and Resources, 28(4): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shijin, Wan Yusheng, Zhang Chengji, *et al.* 2008. Major advanced development gained in studying early Cambrian geology in Luxi area [J]. Land and Resources in Shandong Province, 24(1): 10~20 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei. 2010. Formation and Evolution of Granite-greenstone Belt in Qixingtai Area, Western Shandong Province: Geological, SHRIMP Zircon Geochronology and Geochemical Constraints [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Liu Shuwen, Bai Xiang, *et al.* 2015. Precambrian geodynamics (VIII): Late Archean crustal growth models recorded in the North China Craton [J]. Earth Science Frontiers, 22(6): 109~124 (in Chinese with English abstract).
- Wang W, Liu S W, Cawood P A, *et al.* 2016a. Late Neoproterozoic subduction-related crustal growth in the Northern Liaoning region of the North China Craton: Evidence from ~2.55 to 2.50 Ga granitoid gneisses [J]. Precambrian Research, 281: 200~223.
- Wang W, Liu S W, Santosh M, *et al.* 2015. Neoproterozoic intra-oceanic arc system in the western Liaoning Province: Implications for early Precambrian crustal evolution in the eastern block of the North China Craton [J]. Earth-Science Reviews, 150: 329~364.
- Wang Wei, Yang Hong and Ji Lei. 2017. The identification of the Neoproterozoic 2.52~2.46 Ga tectono-thermal events from the Liaonan terrane and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 33(9): 2 775~2 784 (in Chinese with English abstract).
- Wang W, Zhai M G, Li T S, *et al.* 2014. Archean-Paleoproterozoic crustal evolution in the eastern North China Craton: Zircon U-Th-Pb and Lu-Hf evidence from the Jiaobei terrane [J]. Precambrian Research, 241: 146~160.
- Wang W, Zhai M G, Wang S J, *et al.* 2016b. Neoproterozoic crustal evolution in western Shandong Province of the North China Craton: The role of 2.7~2.6 Ga magmatism [J]. Precambrian Research, 285: 170~185.
- Wang W, Zhang X, Wang S J, *et al.* 2017. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic granitoids from the western Shandong Province, North China Craton, implications for crustal evolution and cratonization [J]. Precambrian Research, 303: 749~763.
- Wang Y J, Zhang Y Z, Zhao G C, *et al.* 2009. Zircon U-Pb geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Taishan sanukitoids (Shandong): Implications for Neoproterozoic subduction in the Eastern Block, North China Craton [J]. Precambrian Research, 174(3~4): 273~286.
- Wang Yue, Zhou Qiming, Zhang Jinlong, *et al.* 2022. Neoproterozoic crustal accretion in western Shandong Province: Evidence from granite

- and monzogranite U-Pb chronology, Hf isotope and rock geochemistry [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 52(2): 463~485 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Zhang Y B, Yang J H, *et al.* 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 167(3~4): 339~362.
- Wu M L, Zhao G C, Sun M, *et al.* 2014. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of major lithologies from the Jiaodong Terrane: Implications for the crustal evolution of the Eastern Block of the North China Craton [J]. *Lithos*, 190: 71~84.
- Yang Fan, Chen Yuelong and Yu Yang. 2022. Genesis and geological significance of late Archean syeno-monzogranite in western Shandong Province [J]. *Geoscience*, 36(4): 1 155~1 172 (in Chinese with English abstract).
- Yang L H, Hou G T, Gao L, *et al.* 2020. Neoproterozoic subduction tectonics in western Shandong Province, China: Evidence from geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopes of metabasalts [J]. *Geological Journal*, 55(5): 3 575~3 600.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, *et al.* 2008. Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in eastern Hebei, eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic evidence [J]. *Precambrian Research*, 167(1~2): 125~149.
- Yin Zhigang, Li Mengmeng, Wu Zijie, *et al.* 2024. The discovery and geological implications of late neoproterozoic kaligranites in Benxi area, Liaoning Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 54(1): 125~139 (in Chinese with English abstract).
- Yu Y, Li D P, Chen Y L, *et al.* 2021. Mantle cooling and cratonization of Archean lithosphere by continuous plate subduction: Constraints from TTGs, sanukitoids, and high-K granites, eastern North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 353: 106042.
- Yuan Lingling, Liu Jie, Zhang Xiaohui, *et al.* 2020. Late Neoproterozoic magmatism and crustal growth in northern Liaoning: Evidence from zircon U-Pb geochronology and petro-geochemistry of the Qingyuan trondhjemitic [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(2): 333~355 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2011. Craton and the formation of North China land block [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 41(8): 1 037~1 046 (in Chinese).
- Zhai Mingguo. 2012. Evolution of the North China Craton and early plate tectonics [J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1 335~1 349 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G. 2014. Multi-stage crustal growth and cratonization of the North China Craton [J]. *Geoscience Frontiers*, 5(4): 457~469.
- Zhai M G and Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview [J]. *Gondwana Research*, 20(1): 6~25.
- Zhang Chao, Cui Fanghua, Zhang Zhaolu, *et al.* 2017. Petrogenesis of ore-bearing dioritic pluton in Jinling area in western Shandong: Evidence from zircon U-Pb chronology and petro-geochemistry [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(6): 1 732~1 745 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Zhai M G, Santosh M, *et al.* 2011. Geochronology and petrogenesis of neoproterozoic potassic meta-granites from Huai'an complex: Implications for the evolution of the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 20(1): 82~105.
- Zhang Qi, Wang Yan and Wang Yuanlong. 2003. On the relationship between adakite and its tectonic setting [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(2): 101~108 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ruiying, Zhang Chengli and Sun Yong. 2013. Crustal reworking in the North China Craton at ~2.5 Ga: Evidence from zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the TTG gneisses in the Zhongtiao Mountain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2 265~2 280 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenfei, Yang Hailin, Gao Jilei, *et al.* 2023. Study on petrological, geochemical, chronological characteristics and formation environment of Neoproterozoic intrusive rocks in Feicheng-Daiyue area, Shandong province [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 52(1): 20~28 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Zhao G C, Santosh M, *et al.* 2010. Late Cretaceous charnockite with adakitic affinities from the Gangdese batholith, southeastern Tibet: Evidence for Neo-Tethyan mid-ocean ridge subduction? [J]. *Gondwana Research*, 17(4): 615~631.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited [J]. *Precambrian Research*, 136(2): 177~202.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, *et al.* 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 107(1~2): 45~73.

附中文参考文献

- 杜利林, 庄育勋, 杨崇辉, 等. 2003. 山东新泰孟家屯岩组锆石特征及其年代学意义 [J]. *地质学报*, 77(3): 359~366.
- 杜利林, 庄育勋, 杨崇辉, 等. 2005. 鲁西孟家屯一种细粒斜长角闪岩的锆石 SHRIMP 年代学 [J]. *地球学报*, 26(5): 429~434.
- 耿元生, 沈其韩, 任留东. 2010. 华北克拉通晚太古代末-古元古代初的岩浆事件及构造热体制 [J]. *岩石学报*, 26(7): 1 945~

- 1 966.
- 郭云鹏, 刘建明, 曾庆栋, 等. 2018. 华北克拉通北缘少郎河地区约 2.5 Ga 的二长花岗岩及地质意义[J]. 地学前缘, 25(4): 11~22.
- 郝乐燃, 杨德彬, 许文良, 等. 2020. 华北克拉通东北部新太古代晚期岩浆作用和地壳增生: 锆石 U-Pb-Hf 同位素、微量元素和地球化学制约[J]. 岩石学报, 36(4): 1 076~1 090.
- 侯贵廷, 王传成, 王延欣, 等. 2008. 鲁西泰山新太古代末闪长岩体的区域构造意义——SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 高校地质学报, 14(1): 22~28.
- 靳立杰, 赵体群, 高继雷, 等. 2017. 鲁西徂徕山地区傲来山序列二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 山东国土资源, 33(12): 1~5.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等. 2015. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J]. 地质学报, 89(12): 2 400~2 418.
- 刘建辉. 2022. 吉林南部新太古代末地壳深熔作用——来自变质石英闪长岩及淡色花岗岩的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 41(2): 303~321.
- 陆松年, 陈志宏, 相振群. 2008. 泰山世界地质公园古老侵入岩系年代格架[M]. 北京: 地质出版社, 1~90.
- 马玉波, 张 勇, 李立兴, 等. 2022. 古元古代胶-辽-吉带造山后转换机制: 来自青城子地区花岗岩体年代学与地球化学特征的制约[J]. 岩石学报, 38(10): 2 971~2 987.
- 毛永生, 彭头平, 范蔚岩, 等. 2015. 鲁西沂水地区早前寒武纪混合岩锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成及其构造意义[J]. 地球化学, 44(6): 517~535.
- 佟 鑫, 王惠初, 张 永. 2023. 华北克拉通新太古代末期的克拉通化: 冀东昌黎碱性花岗岩质岩石的岩石学、锆石年代学和元素地球化学[J]. 岩石学报, 39(9): 2 598~2 618.
- 万渝生, 董春艳, 任 鹏, 等. 2017. 华北克拉通太古宙 TTG 岩石的时空分布、组成特征及形成演化: 综述[J]. 岩石学报, 33(5): 1 405~1 419.
- 万渝生, 刘敦一, 王世进, 等. 2012. 华北克拉通鲁西地区早前寒武纪表壳岩系重新划分和 BIF 形成时代[J]. 岩石学报, 28(11): 3 457~3 475.
- 万渝生, 王世进, 任 鹏, 等. 2015. 鲁西徂徕山地区新太古代岩浆作用——锆石 SHRIMP U-Pb 定年证据[J]. 地球学报, 36(5): 634~646.
- 王惠初, 康健丽, 肖志斌, 等. 2018. 华北克拉通新太古代板块俯冲作用: 来自山西云中地区变质高镁火成岩组合的证据[J]. 岩石学报, 34(4): 1 099~1 118.
- 王世进, 万渝生, 杨恩秀, 等. 2012. 鲁西地区新太古代中期岩浆活动——新甫山与上港等岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年的证据[J]. 山东国土资源, 28(4): 1~7.
- 王世进, 万渝生, 张成基, 等. 2008. 鲁西地区早前寒武纪地质研究新进展[J]. 山东国土资源, 24(1): 10~20.
- 王 伟. 2010. 鲁西七星台地区花岗-绿岩带形成演化——地质、SHRIMP 锆石年代学和地球化学制约[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 王 伟. 2017. 太古宙末变质深熔作用与大陆地壳稳定化——以鲁西为例[C]//2017 中国地球科学联合学术年会论文集(六)——专题 12: 华北克拉通演化、专题 13: 陆陆碰撞带深部结构和动力学意义, 北京, 3.
- 王 伟, 刘树文, 白 翔, 等. 2015. 前寒武纪地球动力学(VIII): 华北克拉通太古宙末期地壳生长方式[J]. 地学前缘, 22(6): 109~124.
- 王 伟, 杨 红, 冀 磊. 2017. 辽南地块新太古代 2.52~2.46 Ga 构造-热事件的识别及地质意义[J]. 岩石学报, 33(9): 2 775~2 784.
- 王 跃, 周奇明, 张金龙, 等. 2022. 鲁西地区新太古代地壳增生事件——来自花岗岩和二长花岗岩 U-Pb 年代学、Hf 同位素和岩石地球化学的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 52(2): 463~485.
- 杨 帆, 陈岳龙, 于 洋. 2022. 鲁西地区新太古代晚期正长-二长花岗岩成因及地质意义[J]. 现代地质, 36(4): 1 155~1 172.
- 尹志刚, 李萌萌, 吴子杰, 等. 2024. 辽宁本溪地区新太古代晚期钾质花岗岩的发现及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 54(1): 125~139.
- 袁玲玲, 刘 洁, 张晓晖, 等. 2020. 辽北新太古代晚期岩浆热事件与陆壳生长: 来自清原奥长花岗岩的锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 36(2): 333~355.
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. 中国科学(地球科学), 41(8): 1 037~1 046.
- 翟明国. 2012. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. 地质学报, 86(9): 1 335~1 349.
- 张 超, 崔芳华, 张照录, 等. 2017. 鲁西金岭地区含矿闪长岩体成因: 来自锆石 U-Pb 年代学和地球化学证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(6): 1 732~1 745.
- 张 旗, 王 焰, 王元龙. 2003. 埃达克岩与构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 27(2): 101~108.
- 张瑞英, 张成立, 孙 勇. 2013. 华北克拉通~2.5 Ga 地壳再造事件: 来自中条山 TTG 质片麻岩的证据[J]. 岩石学报, 29(7): 2 265~2 280.
- 张振飞, 杨海林, 高继雷, 等. 2023. 山东肥城-岱岳地区新太古代侵入岩岩石学、岩石地球化学、年代学特征及形成环境分析[J]. 化工矿物与加工, 52(1): 20~28.